

**А.Г.КУРИЛОВ, Г.И.ЛВОВ**, докт.техн.наук; НТУ «ХПИ»;  
**Г.В.КУРИЛОВ**, канд.техн.наук, ООО НПФ «Технология-2000»

## **ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО СОСТАВА МАТЕРИАЛА ПОДПЯТНИКОВ ПЭД С ЦЕЛЮ ОЦЕНКИ ИХ ВЛИЯНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Було проведено аналіз та оптимізація складу хімічних елементів підп'ятника з ціллю визначення його впливу на антифрикційні властивості та динамічні характеристики підп'ятника. Були проведені експерименти з ціллю виявлення хімічного складу матеріалів та отримання значень антифрикційних характеристик.

The analysis and optimization of structure chemical elements of bearing with the purpose of definition of its influence on antifrictional properties and dynamic characteristics of bearing have been lead. Experiments with the purpose of definition of a chemical compound of materials and reception of values of antifrictional characteristics have been lead.

**Актуальность темы и цель исследования.** В настоящее время одним из вопросов, непосредственно связанных с надежностью и долговечностью погружных электродвигателей серии ПЭД, является проблема повышения работоспособности подшипникового узла. Сроки нормальной работы подшипников определяются видом материала сопряженных поверхностей трения, особенностями охлаждения, смазки и теплоотвода, а также экстремальными условиями эксплуатации: скоростью скольжения, нагрузкой, температурой, средой (жидкой, газовой), где непосредственный и постоянный уход за ПЭД невозможен.

Подпятники – упорные подшипники скольжения, которые предназначены для восприятия осевых нагрузок ПЭД и гидрозащиты, и изготавливаются методом механической обработки из проката бронзы БрО5Ц5С5 ГОСТ 24301-80 или методом литья.

С целью улучшения антифрикционных характеристик подпятников на рабочую поверхность наносится антифрикционное покрытие из баббита Б83 ГОСТ 1320-74. Антифрикционное покрытие обеспечивает надежную работу узлов трения при значении  $pv$  в пределах  $150-200 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{м/с}$ . Для сравнения, показатель  $pv$  для различных видов бронзы составляет не менее  $100 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{м/с}$ . Мягкая оловянная основа баббита обеспечивает хорошую прирабатываемость подпятника, а твердые зерна сурьмы и меди повышают износоустойчивость. Физико-химические и антифрикционные свойства баббитов подробно рассмотрены в монографии [1]. Однако, необходимо отметить некоторые важные требования, которым должен удовлетворять баббит:

- не иметь резко выраженной неоднородной структуры;
- для обеспечения требуемой долговечности подпятника существенное значение имеют прочность соединения баббита с бронзовым основанием подпятника, определяемое способностью слоя сопротивляться усталостному разрушению.
- в общем случае помимо условий работы ( $pv$  и  $T^\circ\text{C}$ ) при выборе антифрикционного покрытия следует учитывать технологические факторы изготов-

ления подпятников и их конструктивные особенности.

Как показал анализ отчетов по эксплуатации УЭЦН на промыслах, изменение эксплуатационных характеристик ПЭД, непосредственно связанных с работой подпятника, происходит не за счет износа антифрикционного покрытия, а в результате его отделения от подпятника. Причиной отслоения является плохая адгезия антифрикционного покрытия к подложке. При визуальном осмотре места отслаивания слоя баббита было установлено, что контактируемые поверхности имеют матовый серый цвет, а отслоившийся баббит очень хрупкий.

Известно, что в антифрикционных покрытиях, при нанесении их на рабочую поверхность подпятника, протекают физико-химические изменения [2–11]. Анализ литературных данных позволяет оценить направление физико-химического взаимодействия баббита с бронзой, способствующего химической эрозии, при температуре плавления баббита. На основании рассмотрения диаграмм состояния меди со всеми компонентами, участвующими в образовании соединения цинк и свинец находятся в бронзе и припое для лужения в таких количествах, что не могут образовывать сложных химических соединений с медью при температуре нанесения баббита – 370–420 °С.

Что касается олова, то большое процентное содержание его в баббите как раз и является источником химической эрозии подпятника. Исследование шлифа подпятника показало существование химической эрозии подпятника по всей поверхности контакта баббита на глубину более 1 мм. На некоторых подпятниках замечено распространение химической эрозии и в ножке. Растворимость олова при различных температурах равна: 350 °С – 11,9 %; 400 °С – 13,5 %; 550°С – 15,8 %.

Согласно диаграмме состояния «медь-олово» при температуре 350 °С и процентном содержании олова в меди более 10 % образуется хрупкое химическое соединение  $CuSn$ . При диффузии олова в бронзу происходит объединение антифрикционного покрытия, снижается его пластичность, меняется коэффициент термического расширения. В результате физико-химических процессов, протекающих при взаимодействии «жидкий баббит+припой-бронза» образуются структуры, способствующие увеличению адгезии антифрикционного покрытия к основанию подпятника [3,4,6,9].

Исследуя прочность соединения 2-х слоев из различных металлов и сплавов, И.М.Поздышев отмечает, что прочность адгезионных связей покрытия будет больше в том случае, когда смешивание металлов основных слоев (в нашем случае Б83+ПОС40) произойдет в жидком состоянии с образованием переходной зоны. Состав переходной зоны должен быть промежуточным между составами заливаемых сплавов.

**Аналитический расчет химического состава смеси Б83+пос40.** Как было отмечено ранее, подпятник представляет собой 3-х компонентную систему, состоящую из бронзы, припоя и баббита, которые имеют каждый свой определенный химический состав. В процессе изготовления подпятника с учетом соблюдения всех правил технологического процесса и использования в качестве исходного материала всех 3-х компонентов, отвечающих ГОСТу, на поверхности баббитового слоя образуется уже новый материал, вернее смесь. Данная смесь образуется как за

счет различных температур плавления исходных материалов, так и за счет химической эрозии (диффузии проникновения различных элементов, входящих в состав используемых материалов: бронза, баббит, припой). В конечном результате это приводит к получению смеси с химсоставом, который не будет отвечать химсоставу Б83 по ГОСТ1320-74 [5,8].

Принятое решение по отбраковке подпятников по несоответствию химсостава Б83 не будет отвечать качеству изготовленного подпятника, более того, для каждого типа размера подпятника процентное содержание соответствующих химических элементов, входящих в состав исходного Б83 по ГОСТу будет различно.

Для определения процентного содержания элементов, входящих в состав смеси баббит+припой предлагается следующая аналитическая формула:

$$\text{процентное содержание элемента в смеси} = \frac{m_1 * \%_{\text{Б83}} + m_2 * \%_{\text{ПОС40}}}{m_1 + m_2} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $m_1(\text{Б83})$  – масса баббита Б83,  $m_2(\text{ПОС40})$  – масса припоя,  $\%_{\text{Б83}}$  – процентное содержание элемента в баббите,  $\%_{\text{ПОС40}}$  – процентное содержание элемента в припое.

$$\text{процентное содержание элемента в смеси} = \frac{m_1 * \%_{\text{Б83}} + m_2 * \%_{\text{ПОС40}} + m_3 * \%_{\text{Бр555}}}{m_1 + m_2 + m_3} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $m_3(\text{Бр555})$  – масса бронзы Бр555,  $\%_{\text{Бр555}}$  – процентное содержание элемента в бронзе.

Аналитическая формула (2) позволяет более точно проанализировать как изменяется процентное содержание химических элементов *Sn* (олово), *Cu* (медь) и *Sb* (сурьма) в смеси антифрикционного покрытия (Б83+ПОС40) в силу протекающих процессов химической эрозии и эту картину можно будет контролировать только с учетом проведения химического анализа приповерхностной зоны контакта смеси и бронзового основания подпятника.

В качестве примера приведем аналитический расчет процентного содержания свинца (*Pb*) в смеси для подпятника ЭД 139.060СБ:

$$\begin{aligned} m_1(\text{Б83}) &= 50 \text{ г}; & m_1 * \%_{\text{Б83}} &= 50 * 0,35\% = 0,175 \text{ г}; \\ m_2(\text{ПОС40}) &= 5 \text{ г}; & m_2 * \%_{\text{ПОС40}} &= 5 * 60\% = 3 \text{ г}; \\ x\%_{\text{Pb в смеси}} &= \frac{0,175 + 3}{50 + 5} \cdot 100\% = 5,77\%. \end{aligned}$$

Аналитический расчет процентного содержания свинца (*Pb*) в смеси для подпятника ЕЮТИ.Г.1176.800СБ:

$$\begin{aligned} m_1(\text{Б83}) &= 73 \text{ г}; & m_1 * \%_{\text{Б83}} &= 73 * 0,35\% = 0,26 \text{ г}; \\ m_2(\text{ПОС40}) &= 5 \text{ г}; & m_2 * \%_{\text{ПОС40}} &= 5 * 60\% = 3 \text{ г}; \\ x\%_{\text{Pb в смеси}} &= \frac{0,26 + 3}{73 + 5} \cdot 100\% = 4,18\%. \end{aligned}$$

Для подпятника ЕЮТИ.052.600СБ:

$$\begin{aligned} m_1(\text{Б83}) &= 70 \text{ г}; & m_1 * \%_{\text{Б83}} &= 70 * 0,35\% = 0,245 \text{ г}; \\ m_2(\text{ПОС40}) &= 5 \text{ г}; & m_2 * \%_{\text{ПОС40}} &= 5 * 60\% = 3 \text{ г}; \\ x\%_{\text{Pb в смеси}} &= \frac{0,245 + 3}{70 + 5} \cdot 100\% = 4,3\%. \end{aligned}$$

Во всех трех примерах аналитического расчета использованы значения %-го содержания химических элементов, входящих в состав Б83 и ПОС40, соответствующих ГОСТу.

**Анализ химического состава антифрикционного покрытия (смеси Б83+пос40), получаемого в результате нанесения Б83 на бронзовую поверхность подпятника.** Для подтверждения вышеизложенного были проведены работы по определению %-го химического состава, как отдельных составляющих баббита Б83 и припой ПОС40, так и смеси, получаемой в результате технологического процесса нанесения Б83 на бронзовую поверхность подпятника. Процентное содержание химических элементов определялось методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) [12, 13].

Проведенные анализы химического состава баббита Б83 до нанесения на поверхность подпятника ЭД139.060СБ и подпятника ЕЮТИ.Г.1216.500СБ по процентному содержанию *Pb* (свинца) в баббите Б83 ГОСТ 1320-74 показывают, что они попадают в пределы допуска 0,35 %, а анализ смеси, снятой с выше указанных подпятников методом расплавления, показывает процентное содержание свинца в пределах 2,95%. Изменилось процентное содержание *Cu* (меди) в сторону уменьшения на 0,7÷0,9 %, *Sn* (олово) уменьшилось на 2,47÷3,22 %, *Sb* (сурьма) в сторону увеличения на 0,53÷1,12 %. Аналогичная картина наблюдается и при проведении химического анализа баббита Б83 до нанесения на поверхность подпятника, и анализа в целом одного сегмента, вырезанного с подпятника ЭД139.060СБ с участием всех 3-х компонентов (баббит Б83, припой ПОС40, бронза 555ОЦС).

Рассматривая процентное содержание баббита Б83 до нанесения на бронзовую поверхность подпятника, мы видим, что химический состав Б83 полностью соответствует ГОСТ 1320-74 по всем химическим элементам, и в то же время, рассматривая результаты анализа %-го содержания на сегменте подпятника, мы имеем совсем иную картину изменения %-го содержания смеси 3-х компонентов – баббит Б83, припой ПОС40, бронза 555ОЦС.

Для оценки изменения %-го содержания только в смеси (Б83+ПОС40) без участия Бр555ОЦС был проведен анализ химического состава компонентов в количестве соответственно  $m_1 = 41,2$  г.,  $m_2 = 2,2$ г. Затем, соблюдая «Инструкцию технологического процесса нанесения антифрикционного покрытия на бронзовую поверхность подпятника», было произведено смешивание 2-х компонентов Б83+ПОС40 в стальной емкости при  $t = 390$  °С. Как показал РФ анализ значения процентного содержания химических элементов имеет значение отличное от исходного. Аналитический расчет по формуле (1) к примеру по *Pb* (свинцу):

$$m_1 (\text{Б83}) = 41,2 \text{ г}; \quad m_1 * \%_{\text{Б83}} = 41,2 * 0,021\% = 0,01 \text{ г};$$

$$m_2 (\text{ПОС40}) = 2,2 \text{ г}; \quad m_2 * \%_{\text{ПОС40}} = 2,2 * 61,89\% = 1,36 \text{ г};$$

$$x\%_{\text{Pb в смеси}} = \frac{0,01 + 1,36}{41,2 + 2,2} \cdot 100\% = 3,156\%.$$

Разница между аналитическим расчетом и РФ анализом смеси составляет 0,23 %, а если брать с учетом погрешности измерения РФА, то разница между аналитическим расчетом и РФА составит 0,07 %.

Таким образом, полученные данные по химическому анализу %-го содержа-

ния компонентов баббита Б83 1320-74, припоя ПОС40 ГОСТ 21931-76 и антифрикционного покрытия, в нашем случае смеси (Б83+ПОС40), на поверхности бронзового подпятника показывают их отличие, что хорошо подтверждает протекание физико-химических изменений, а именно химической эрозии. Диффузионное проникновение химических элементов, входящих в состав исходных компонентов Б83, ПОС40, Бр555ОЦС не только приводит к изменению %-го содержания химических элементов исходного компонента, но и обуславливает этим самым связь антифрикционного покрытия к бронзовой подложке подпятника, так называемую адгезию. А как известно [4,8,9] степень адгезии, т.е. сцепления приведенных в контакт разнородных тел (компоненты Б83+ПОС40 и БР555ОЦС) обуславливается межмолекулярным взаимодействием или химической связью, и как конечный результат самопроизвольным переносом химических элементов и выравниванием неоднородной концентрации атомов или молекул вследствие теплового движения частиц.

**Проведение (в обязательном порядке) испытания подпятников от поставляемой партии в условиях работы в сборочной единице (ПЭД или гидрозащиты).** Вся практика промышленного производства подпятников показывает, что оценка качества изготавливаемого подпятника определяется как высокой адгезией антифрикционного покрытия (баббитового слоя) к бронзе, так и устойчивостью к усталостному разрушению входящих элементов. А это связано в первую очередь с проведением испытания подпятника на изделии и оценке тех требований, которые предъявляются к подпятнику в целом.

В соответствии с полученными результатами осмотра подпятников после эксплуатации необходимо было определиться в видах испытаний и в методах проведения испытаний. Оценка качества изготовления подпятника устанавливается с помощью испытаний на образцах, лабораторных установках и на стендах, имитирующих работу подпятников в изделии (ПЭД, гидрозащита) [2, 14-16]. Масштабность проведения испытаний до установки подпятника на изделие определялась, как было указано выше, на основании известных данных о протекании физико-химических изменений в антифрикционных покрытиях при нанесении их на рабочую поверхность подпятника.

На основании выше изложенного, необходимость проведения испытаний обусловлена наличием факторов, возникающих в готовом изделии не только за счет отклонений, допущенных при изготовлении подпятников, но также за счет физико-химических процессов, являющихся неотъемлемыми при нанесении расплавленного баббита на поверхность подпятника.

Объем и содержание испытаний должны обеспечить поставку на производство ПЭД и гидрозащит только продукцию высокого качества, и оно определяется Заказчиком.

**Цель испытания.** Испытания ставят своей целью выявить дефекты в готовом изделии (подпятнике), а именно:

- оценить устойчивость «опорной ножки» сегмента подпятника к усилию нагрузки, и выявлению дефектов недоброкачественного изготовления бронзового проката или литья;

- оценка износных и адгезионных свойств антифрикционного покрытия (Б83) к бронзовой поверхности подпятника.

Объект испытания. В качестве объекта испытания взяты подпятники (ПЭД и гидрозащиты), изготовленные методом механической обработки из проката бронзы Бр05Ц5С5 ГОСТ24301-80.

**Методы испытания.** В соответствии с общепринятыми методами оценки качества изделия были использованы следующие способы контроля подпятников:

- визуальный (внешнее состояние) – 100% (вся партия);
- механический (методом откалывания или протачиванием на токарном или фрезерном станках – 2-3 шт. от партии 1000шт.);
- механический (методом оценки износных характеристик подпятника на испытательном стенде – 2-3 шт. от партии 1000шт. или 1-2 шт. от партии 200-300 шт. каждого типоразмера).

**Требования к параметрам испытаний.** Визуальный контроль устанавливает:

- наличие раковин, механических включений, сыпи на поверхности антифрикционного покрытия не допускается;
- на обработанных поверхностях бронзового основания подпятника допускаются раковины, размеры и глубина которых определяется КД подпятника;
- цвет антифрикционного покрытия после обработки на токарном станке должен иметь цвет баббита (блестящая металлическая поверхность со слабой желтизной). Если поверхность антифрикционного покрытия имеет цвет алюминия, то такие подпятники претерпевают хрупкое разрушение при механических испытаниях и антифрикционный слой разрушается при малых удельных нагрузках.

Механические испытания (откалывание, проточка):

- не допускается отслоение антифрикционного покрытия Б83;
- при оценке износных характеристик подпятника, износ и оплавление антифрикционного слоя не допускается, температура в зоне трения в пределах 35-55°C, коэффициент трения в пределах 0,02-0,04 за исключением первоначального периода приработки в течении 5-10 мин в зависимости от времени нагрузки;
- химическую эрозию и глубину проникновения эрозии на границе антифрикционного покрытия и бронзы определяют на шлифе сечения сегмента подпятника, чем больше глубина проникновения, тем выше адгезионные свойства антифрикционного покрытия к бронзовому основанию подпятника.

Исследования отработки подшипниковых узлов ПЭД и гидрозащиты, динамики ротора, гидродинамических исследований с последующим переносом и моделированием лабораторных и натурных испытаний является в настоящее время актуальной проблемой [17, 18]. Для ее решения исключительно важно, чтобы испытательный стенд или экспериментальная установка возможно точнее воспроизводила схему работы подшипникового узла действующей машины (ПЭД, гидрозащиты и др.)

Изучение поведения подшипниковых пар, в частности подпятников ПЭД и

гидрозащиты, проводили на экспериментальной установке УТИК-1 (рис.1), которая позволяет изучать поведение подшипниковых пар трения в широком диапазоне скоростей скольжения и величины прикладываемой нагрузки в среде смазочного материала, что дает возможность создать условия, близкие к условиям эксплуатации. Кроме получения износных характеристик, установка позволяет изучать динамические нагрузки на подшипниковые узлы, проводить гидродинамические исследования [15,16].

### Описание экспериментальной установки трения и износа УТИК-1.

Стенд износных характеристик (рис. 1) состоит из маслonaполненного цилиндра (1), установленного на станине с регулируемыми опорами. Через ось цилиндра в нижней его части проходит упорный вал (2) с приводом от электродвигателя (3). На валу закрепляется пята (4) (изготовленная из стали 40Х,  $R_c = 55-65$ ). В верхней части цилиндра, по оси, расположен шток (5), проходящий через отверстие в крышке цилиндра. Верхний конец штока через шарикоподшипник и рычаг (6) нагружается в виде гирь (7). Прилагаемая к штоку нагрузка через металлический шарик (8) (предназначенный для самоустановки подпятника), передается на подпятник (9), опирающийся на пята. Внутренняя полость цилиндра заполнялась трансформаторным маслом Т-1500.

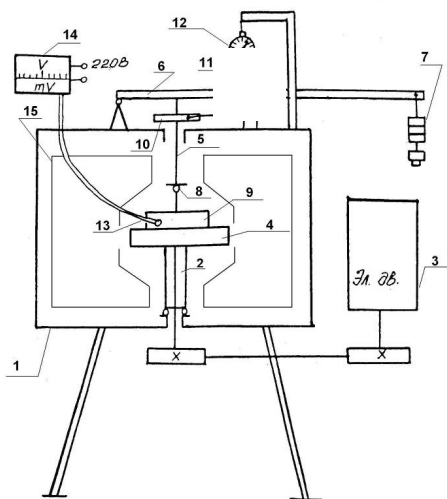


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

На штоке жестко закреплен шкив (10), к которому крепится тросик (11). Другой конец тросика крепится к динамометру (12), отображающему величину момента трения. Термopар (13) зачеканена в корпус подпятника (рис.2) и выведена через отверстие в крышке цилиндра к клеммам милливольтметра (14), гидродинамический экран (15).

Условия испытания:

- частота вращения вала  $n = 3000$  об/мин;

- величина нагружения: 20 – 3000 кг;
- температура окружающей среды  $+18^{\circ}\text{C} \div +25^{\circ}\text{C}$
- время испытания не менее 60 мин;
- масляная среда: Т-1500 ГОСТ 982-80, МДПН.

В процессе испытаний фиксировались температура (показания милливольтметра), сила трения (показания динамометра) и время проведения испытаний.

При испытаниях использовались два вида термопар:

1. ТХК – (Хромель- Копель) – диапазон измерений  $(-50 \div +600^{\circ}\text{C})$ ,
2. ТХА – (Хромель- Алюмель) – диапазон измерений  $(-50 \div +1000^{\circ}\text{C})$ .

Перед установкой проводилась тарировка термопар согласно ГОСТ 3044-61. Термопара зачеканивалась на высоте 0,5 мм от зоны контакта в центре зоны трения (рис. 2)

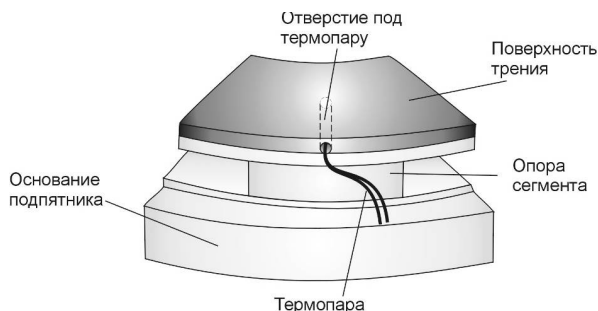


Рисунок 2 – Схема установки термопары

Сила трения фиксировалась с помощью показаний динамометра. Далее по формуле определяется коэффициент трения  $\mu = \frac{F_{тр}}{P}$ , где  $F_{тр}$  – сила трения,  $P$  – нагрузка на подпятник.

Погрешность измерений:

- по системе нагружения и замера силы трения  $\pm 2\%$ ;
- по замеру объемной температуры в зоне трения  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ;
- измерения износа весовым методом  $\pm 2\%$  и  $\pm 5\%$  линейным методом.

В качестве примера приводим результаты испытания подпятников: ЭД139.060СБ и ЕЮТИ.Г.1216.500СБ. Для подпятника ЭД139.060СБ электродвигателя ПЭД прикладываемая нагрузка составляет от 70 кг до 200 кг с постепенным нагружением через отдельный промежуток времени и при этом одновременно фиксировалась сила трения ( $F_{тр}$ ), время испытания составляет 70 мин с приложением максимальной нагрузки 181,875 кг в течении 40 мин. Анализируя значение коэффициента трения  $\mu$  можно видеть, что в начальный период приработки 1-15мин  $\mu$  имеет значение 0,056 и снижается до значения 0,028 и в оставшееся время испытания имеет значение в пределах 0,022-0,021. Объемная температура, замеренная в конце эксперимента составляет  $35^{\circ}\text{C}$ . На рис. 3 показаны зависимости  $\mu = \mu(\tau)$  и  $P = P(\tau)$ .



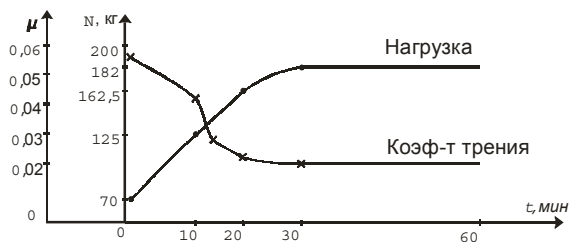


Рисунок 3

Аналогичный эксперимент был проведен и для подпятника гидрозащиты ЕЮТИ.Г.1216.500СБ с разницей только по величине прикладываемой нагрузки  $P = 150-700$  кг. Также как и для подпятника ЭД139.060СБ при испытании подпятника ЕЮТИ.Г.1216.500СБ наблюдается аналогичная картина (рис. 4), первоначальный период приработки в течении  $\tau = 1-12$  мин, где коэффициент трения  $\mu$  с 0,74 уменьшается до 0,025 и на протяжении 40 мин при максимальной нагрузке  $P = 700$  кг имеет значение 0,023-0,021. Объемная температура в конце эксперимента составляла  $40^\circ\text{C}$ . На рис. 5 показана зависимость  $\mu = \mu(\tau)$  и  $P = P(\tau)$ . Анализируя полученные данные испытания двух типов подпятников как для ПЭД – ЭД139.060СБ, так и для гидрозащиты – ЕЮТИ.Г.1216.500СБ, независимо от назначения использования данных подпятников в изделии, но изготовленных по единой технологии с использованием одних и тех же составляющих компонентов (Б83, ПОС40 и БрО5Ц5С5), наблюдается аналогичная картина – период приработки  $\tau = 10-15$  мин, а затем наступает стабильная нормальная работа подпятника с установившимся значением коэффициента трения  $\mu = 0,021-0,023$  (рис. 3, 4). Объемная температура находится в пределах  $35-40^\circ\text{C}$ .

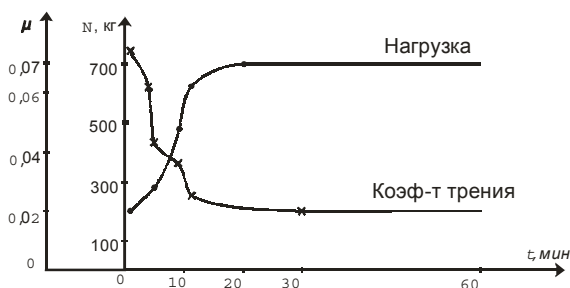


Рисунок 4

После проведения испытания, внешний осмотр показал, что в обоих случаях на поверхности антифрикционного покрытия просматриваются под микроскопом (увеличение  $\times 8$ ) следы приработки, при этом полностью отсутствуют какие-либо следы оплавления баббита. Износ, замеренный как весовым, так и линейным способами на данном промежутке времени испытания отсутствует.

Необходимо отметить, что антифрикционная поверхность подпятников не подвергалась шабрению перед испытанием для того, чтобы за короткий промежу-

ток времени 60-70 мин испытания можно было просмотреть поверхность трения и дать оценку, как приработки, так и определению величины значения износа. Аналогичные стендовые испытания проводятся и с другими типоразмерами подпятников ПЭД и гидрозащиты.

Сопоставляя результаты химического анализа исходного материала Б83 до нанесения для 2х типов подпятников ЭД139.060СБ и ЕЮТИ.Г.1216.500СБ, где значения %-го содержания *Pb* (свинца) находилась в пределах 0,041 % и 0,179 %, а в смеси антифрикционного покрытия *Pb* (свинца) составляло 2,953 % и химического анализа антифрикционного покрытия совместно с бронзовой поверхностью на сегменте подпятника ЭД139.060СБ, где содержание *Pb* (свинца) составляет 3,003 %. При этом исходный Б83 имел 0,24 % *Pb* (свинца).

Можно видеть, что, начиная от процесса нанесения антифрикционного покрытия Б83, где %-е содержание входящих химических элементов соответствует ГОСТ 1320-74, затем процесс химической эрозии, приводящий к изменению %-го содержания химических элементов смеси как с участием (Б83+ПОС40+БрО5Ц5С5), так и без участия БрО5Ц5С5, до проведения испытания на установке и после проведения испытаний получаем результаты, которые показывают нормальную работу подпятника в условиях приближенных к реальной работе в ПЭД и гидрозащите. Получение положительных результатов испытания подпятников свидетельствует о том, что действительно в антифрикционном покрытии протекают физико-химические процессы, происходит изменение %-го содержания химических элементов, которые с одной стороны приводят к отличию %-го содержания химических элементов от их исходных значений по ГОСТ, а с другой стороны этот необратимый процесс обеспечивает адгезию антифрикционному покрытию к бронзовому основанию подпятника и этим самым устойчивость к усталостным разрушениям антифрикционного покрытия. Это еще раз подтверждает, что отбраковка подпятников на входном контроле службами ОТК по несоответствию %-го содержания химсостава Б83 ГОСТу не будет отвечать качеству изготовленного подпятника, тем более, что для каждого типоразмера подпятника %-е содержание химических элементов зависит, как показал аналитический расчет, от весового количества входящих составных компонентов.

Необходимо отметить важную роль технологического процесса нанесения антифрикционного покрытия на бронзовую поверхность подпятника. Существуют различные методы нанесения (метод окунания, метод центробежного напыления, методом закладывания дозированного брикета баббита [19]). Все эти методы имеют недостатки в том, что в процессе нанесения антифрикционного покрытия не происходит процесс механического смешивания Б83+ПОС40 и образование так называемой смеси в расплавленном состоянии, которая в результате химической эрозии обеспечивает адгезию антифрикционного покрытия к бронзовой поверхности подпятника.

Опыт последних лет по нанесению антифрикционного покрытия Б83 на бронзовую поверхность методом окунания показал, что такой способ обеспечивает 40 % качественной продукции, а в основном до 60 % происходило отслоение баббита Б83 от поверхности бронзы в процессе механической обработки заготовок деталей подпятников с залитым слоем баббита. Нами разработан новый способ

нанесения антифрикционного покрытия на бронзовое основание подпятника под названием «Сухой метод нанесения Б83», который обеспечивает получение смеси на поверхности подпятника, обладающей высокой адгезионной способностью и устойчивостью к усталостному разрушению антифрикционного покрытия. ООО НПФ «Технология-2000» изготавливая более 20 типов подпятников различной геометрии и обеспечивая ими, как заводы-изготовители ПЭД, так и промыслы на протяжении более 15 лет, не имеет нареканий на качество изготовленных подпятников, в частности по отслоению Б83, поломки ножек или сегмента подпятника, интенсивности износа.

### **Выводы:**

- 1 Установлено, как теоретически, так и экспериментально, что в антифрикционном покрытии при нанесении его на рабочую поверхность подпятника протекают физико-химические изменения, направленные на взаимодействие баббита + припой с бронзой и способствующие химической эрозии.
- 2 Образующаяся в антифрикционном покрытии смесь (Б83+ПОС40) по своему химическому составу в %-м содержании отличается от %-го содержания химических элементов их исходного значения по ГОСТ.
- 3 Различие %-го содержания химических элементов входящих в состав смеси антифрикционного покрытия можно рассчитать аналитическим методом и экспериментально проверить методом химического анализа, зная при этом весовой состав входящих компонентов антифрикционного покрытия.
- 4 Рекомендация по процентному содержанию химических элементов, входящих в состав смеси баббит+припой на бронзовой поверхности в зависимости от типоразмера подпятника и весового количества входящих элементов:
  - Изменение %-го содержания Pb (свинца) может колебаться от 1 % до 7 %;
  - Изменение %-го содержания Cu (меди) от 0,5 % до 1,5 %, Sn (олова) от 1 % до 3 %, Sb (сурьмы) от 0,5 % до 2 %.

Технологический процесс нанесения антифрикционного покрытия на бронзовую поверхность подпятника при всем своем многообразии способов является довольно сложным процессом и требует грамотного подхода, четкого представления и соблюдения всех требований «Инструкции нанесения...», которые обеспечивают в процессе выполнения работы по нанесению антифрикционного покрытия его высокую адгезионную способность к бронзовому основанию подпятника и стабильную стойкость к износу и усталостному разрушению и, этим самым, надежную работу подпятника в ПЭД и гидрозащите в системе УЭЦН.

Окончательная оценка качества изготовления подпятников как ПЭД, так и гидрозащиты может дать только проведение испытания их, как на стендах имитирующих работу подпятника, так и в изделии.

**Список литературы:** 1. *Шагин А.И.* Антифрикционные сплавы. – М: Металлургия, 1956. – 326 с. 2. Трение изнашивание и смазка. Книга 1 под редакцией д.т.н. И.В. Кригельского. – М: Машиностроение, 1978. 3. *Гаркунов и др.* Избирательный перенос в узлах трения. – М.: Транспорт, 1969. – 103 с. 4. Толковый металлургический словарь. Под ред. д.т.н. В.И. Куманина. – М. 1989. 5. *Буше Н.А.* Подшипниковые сплавы для подвижного состава. – М: Транспорт, 1967. – 224 с. 6. *Рибиндер П.А.* Физико-химическая механика – новая область науки. – М: Знание, 1958. – 36 с. 7. *Лихтман В.И., Щукин Е.Д., Рибиндер П.А.*

Физико-химическая механика материалов. – М: АН СССР, 1962. – 308 с. **8.** Поверхностная прочность материалов при трении. Под общей ред. д.т.н. Костецкого Б.И. – Киев, Техника, 1976. – 296 с. **9.** *Семенов А.П.* Схватывание материалов. – М: Машгиз, 1958. – 280 с. **10.** *Курилов Г.В.* Некоторые аспекты кинетической концепции разрушения твердых смазочных покрытий при трении // Поверхность, Физика, химия, механика. – № 9. – М.: 1982. – С. 138-148. **11.** *Буланов В.В., Гребень А.М., Курилов Г.В., Суходольская Е.А.* Сплавы для подшипниковых узлов погружных электродвигателей серии ПЭД. Машины и нефтяное оборудование. – М.: 1984. – С. 13-18. **12.** Рентген-флуоресцентный анализ / Сборник научных трудов под ред. Х. Эрхардта. – М: Металлургия, 1985. – 255 с. **13.** Методические указания к лабораторным работам по курсу «Актуальные проблемы физического материаловедения» для студентов специальности «физическое материаловедение» / *Л.И. Гладких, И.Ф. Михайлов, С.С. Борисова, М.В. Решетняк, О.В. Соболев, Л.П. Фомина.* – Харьков, НТУ «ХПИ», 2006. – 80с. **14.** *Курилов Г.В., Савченко и др.* Прибор для измерения силы трения в глубоком вакууме. Авт. свидетельство № 198766 от 28.07.1967 г. **15.** *Курилов Г.В. и др.* Методика исследования твердых смазочных покрытий на основе MoS<sub>2</sub>. Заводская лаборатория № 2, 1973. – С. 48-50. **16.** *Лугин В.П., Курилов Г.В., Резников В.Д. и др.* Стенд для исследования и отработки подшипниковых узлов погружных электродвигателей серии ПЭД // Технология электрического производства. – Вып. 7 – М: 1981. – С. 7-9. **17.** *Костецкий Б.И. и др.* Испытания металлов на износ (методы и машины). – К: Машгиз, 1955. – 125 с. **18.** *Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В.* Моделирование трения и изнашивания в машинах. – М: Машиностроение, 1982. – 191 с. **19.** *Котов Г.М., Цветков В.В. и др.* Способ нанесения баббита на подшипник. Авт. свидетельство №98105191/02 от 20.12.2000 г.

*Поступила в редакцию 16.07.2008.*

УДК 539.3

**В.И.ЛАВИНСКИЙ**, докт.техн.наук; **П.А.ЛАРИН**; НТУ «ХПИ»

## УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ КРУГЛОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Запропонована робота присвячена розв'язанню модельної задачі про пружно-пластичне деформування круглої пластини під дією імпульсного поперечного та дотичного пондеромоторного, розподіленого по поверхні, навантаження. Отримано вираз з розподілу прогинів у радіальному напрямку при поздовжньо-поперечному вигині пластинки. З'ясовано вплив згинальних моментів від дотичних сил на характер розподілів прогинів.

The present work is devoted to the decision of a modelling problem on elastic-plastic deformation of a round plate, under action pulse cross-section and, allocated on a surface, a tangent ponderomotor loading. Expressions of distribution of deflections in a radial direction are received at a longitudinal - cross-section bend of a plate. Influence of the bending moments from tangents of forces on character of distributions of deflections is found out.

**Введение.** Практические использования магнитно-импульсных методов, их достоинства и промышленные применения достаточно полно описаны авторами монографии [1]. Несмотря на широкий спектр проблем, решаемых с использованием энергии электромагнитных полей, современное производство требует дальнейшего расширения перечня технологических процессов, в которых магнитно-импульсные методы позволяют реализовать неоспоримые преимущества в сравнении с известными механическими или химическими способами [2].

Как указано в работе [3], существует принципиальная возможность создания условий для эффективного силового действия для обработки стальных листовых заготовок. При электродинамическом анализе такого подхода оказалось, что тра-